第 37 卷第 6 期
2017 年 3 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.6
Mar.,2017

DOI: **10.5846/stxb201511012207**

潘竟虎,黄克军,李真.2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系.生态学报,2017,37(6):1888-1899.

Pan J H, Huang K J, Li Z.Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010.Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1888-1899.

2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系

潘竟虎[1,*],黄克军[2],李　真[1]

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州　730070

2 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉　430074

摘要:通过改进的光能利用率 CASA 模型估算 2001—2010 年间疏勒河流域陆地生态系统的净第一性生产力(NPP),采用线性趋势分析、变异系数和 Hurst 指数等方法,分析了 NPP 的时空变化特征及其与气候因子的相关性。结果表明:①疏勒河流域 NPP 的空间分布具有明显差异,空间上呈现西北低、东南高的趋势,且具有较明显的经向“条带”分布特征,2001—2010 年,NPP 平均值为 102.26 gC m^{-2} a^{-1}。②2001—2010 年,疏勒河流域 NPP 总体呈增长趋势,年际波动较大,NPP 明显增加的区域占总面积 25.15%,明显减小的区域约占 11.93%。③Hurst 指数分析显示,疏勒河流域 NPP 变化的同向特征强于反向特征,其中持续改善地区占总面积的 78.3%,21.7%的区域将由改善转为退化。④在年尺度上,降水是植被 NPP 变化的主要影响因素,NPP 与降水呈弱的正相关关系,与温度相关性不显著;在月尺度上,温度是 NPP 变化的主要控制因子。疏勒河流域 NPP 对气候因子不存在明显的时滞和累积效应。

关键词:净初级生产力(NPP);CASA 模型;时空变化;MODIS;疏勒河流域

Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010

PAN Jinghu[1,*], HUANG Kejun[2], LI Zhen[1]

1 *College of Geographic and Environmental Science*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou* 730070, *China*

2 *Faculty of Information Engineering*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*

Abstract: Vegetation net primary productivity (NPP) is the solar energy fixed by vegetation during photosynthesis, which can be described as the net increase in biomass per unit time per unit area. The NPP, which plays an important part in the terrestrial carbon cycle, directly reflects the production capacity of terrestrial vegetation under natural conditions, and determines the ability of ecosystems to store carbon. The Shule River basin, located in northwest Gansu Province, is an important water source and ecological division within the Hexi Corridor. Increasing human populations and regional economic development have resulted in severe environmental problems within the study area, including natural disasters, vegetation degradation, and soil erosion. The study of NPP in the Shule River basin can provide a scientific basis not only for the prevention and control of natural disasters but also for the improvement of the ecological environment. This is important for local sustainable ecological development in the context of global climate change. The NPP in the Shule River basin was calculated using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images, meteorological data, and vegetation type maps, along with an improved Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) NPP model. The spatio-temporal

基金项目:国家自然科学基金项目(41361040);甘肃省高校基本科研业务费项目(2014-63);甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA117)

收稿日期:2015-11-01;　　**网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: panjh-nwnu@163.com

characteristics of NPP in the Shule River basin were analyzed for the period 2001—2010, using linear trend analysis, the coefficient of variation, and the Hurst index. The relationship between NPP and climatic factors was investigated. The results showed that: (1) NPP in the Shule River basin had considerable regional differences. NPP gradually decreased from southeast to northwest in the Shule River basin, and presented a noticeable linear pattern in a longitudinal direction. The inter-annual variability showed overall growth from 2001 to 2010. The annual NPP value ranged from 99.97 to 127.2 gC m^{-2} a^{-1}, with the minimum value occurring in 2001 and the maximum in 2010. The average annual NPP was 125.08 gC m^{-2} a^{-1} over the period 2001—2010; (2) however, within this overall increase, the annual NPP across the Shule River basin varied from 2001 to 2010. Of the total area of the basin, 25.15% showed a significant increase in NPP, whereas 11.93% showed a significant decrease; (3) the Hurst index analysis indicated that the majority of changes in NPP followed the same direction; 78.3% of the entire study area was predicted to follow a continuously increasing trend, while 21.7% of the total area will decrease in future; and (4) there was a weak relationship between NPP and annual precipitation, and no significant relationship between NPP and average temperature at an annual scale, indicating that precipitation was the key influencing factor. However, at a monthly scale, temperature was the dominant climatic factor affecting NPP in the study region. Analysis of the relationships between NPP, precipitation, and temperature showed that correlations at an annual scale were lower than those at a monthly scale. Precipitation and temperature exerted a variety of influences on different parts of vegetation NPP. The relationship between NPP and climatic factors suggested that NPP displayed no obvious time lag or cumulative effect due to climatic factors.

Key Words: net primary productivity (NPP); CASA model; temporal and spatial variation; MODIS; Shule River basin

植被净初级生产力(NPP)是单位面积和单位时间内绿色植物从光合作用所获取的有机物质总量中去除自养呼吸以后的干物质量[1]。NPP 能够直观地反映出地表植被在自然环境状况中的生产能力,常常用作判定碳源/碳汇以及区域生态支持能力的重要因子[2]。此外,NPP 的变化对温度、降水等气候因素较为敏感,而这些因素与植物代谢密切相关,因此 NPP 的变化能够很好地表征全球气候变化[3]。掌握区域 NPP 年际间的定量时空演变特征趋势,对于理解全球气候变化对陆地生态系统植被变化过程的作用机制,科学评价区域生态系统的调节过程以及估算陆地碳源/汇具有重要的理论和实践意义。自 Ebermayer[4]在 1876 年最早开始研究 NPP 以来,NPP 研究经历了从传统的站点实测法到大量的统计回归法再到多源数据的机理模型法 3 个阶段。在区域尺度上,全空间覆盖测量 NPP 显然具有极大难度。随着遥感技术的发展,利用模型结合遥感数据进行植被 NPP 的估算及其分布研究逐渐成为主流的研究方法。目前国内外提出用于估算 NPP 的模型多达 20 余种[5],大体上可归纳为 3 类[6]:气候相关模型(统计模型)、光能利用率模型(参数模型)和生态系统过程模型(机理模型)。Carnegie-Ames-Stanford Approach(CASA)模型是属于基于光能利用率机理的一种过程模型,它采用光能利用率与光合有效辐射两个因子并引入气温、降水等光合作用的胁迫参数来计算 NPP,在区域和全球陆地植被 NPP 监测中被广泛应用[7]。在区域尺度上,由于植被 NPP 变化受植被自身生理特征差异的影响,对气候、地形、土壤以及人类活动等因子变化的敏感性和响应特征存在较大差别,NPP 时空演变的驱动机制是研究的难点之一。在国内,学者们针对 NPP 的测算方法、时空分异格局、驱动因子等不同视角开展了研究[8-9]。研究区域多集中在全国以及东北、华北等大区域或省域尺度[10],而针对作为一个较完整生态系统的流域尺度的研究则相对较少。

疏勒河流域深居内陆,气候干旱,生态环境敏感、脆弱。近年来,受气候变化和人类活动加剧的影响,流域出现了草场退化、湿地萎缩、土地沙漠化、次生盐渍化、地下水位下降等一系列生态环境问题[11],并与河西走廊其他内陆河下游一样,成为我国沙尘源区之一。区内著名的风景名胜月牙泉由于水位下降严重,目前靠“打点滴”来维系。如何实现流域自然-经济-社会的协调和可持续发展,是值得探讨并且非常严峻的现实问题。因而,研究疏勒河流域 NPP 时空变化,进而理解流域的碳循环过程和物质的流动方向,对于解决流域生

态环境问题具有重要的现实意义。此外,研究发现,全球未知碳汇可能存在于陆地生物圈,特别是北半球中高纬度陆地生态系统[12],而疏勒河流域恰好处于这一范围内,因此对疏勒河流域的植被 NPP 研究具有重要价值。目前针对疏勒河流域长时间序列的 NPP 估算鲜见报道,疏勒河流域退耕还林(草)、生态综合治理工程的实施,农业灌溉暨移民安置综合开发项目的实施,以及国家风电基地开发等引起的区域植被 NPP 空间分布及其年际变化状况如何? NPP 对气候变化可能的响应机制是什么? 这些问题亟需回答。因此,本文采用2001—2010 年遥感数据、气象站点观测数据以及地面气象数据,利用改进的 CASA 模型建立疏勒河流域植被NPP 遥感估算模型,重建了流域植被 NPP 年际变化的时空序列,旨在揭示:(1)疏勒河流域植被 NPP 的空间分布格局及其年内变化趋势;(2)气候因子与植被 NPP 间的关系。希望本研究能为 CASA 模型在流域尺度上的应用提供科学依据,同时为区域生态系统保护措施的制定和实施提供决策参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

疏勒河流域是甘肃河西地区三大内陆河之一,地处甘肃省河西走廊西段,介于 92°11′—98°30′E,38°00′—42°48′N 之间(图 1)。行政区划上包含甘肃省的玉门、敦煌、瓜州、肃北县的大部分、阿克塞县的一部分,以及张掖市肃南县和青海省天峻县的一部分,面积 13.36×10^4 km^2。干流全长约 670 km,多年平均径流量10.31×10^8 m^3。地貌上由南部的祁连山地、中部的冲积平原和北部的马鬃山 3 大单元构成,属典型的大陆性荒漠气候,年均气温 6.9—8.8℃,大部分地区年均降雨量在 60 mm 以下,年蒸发量却高达 3000 mm。疏勒河流域自汉代以来就一直是河西著名的“粮仓”,灌溉农业发达。始于 1996 年、历经 10a 的疏勒河农业灌溉暨移民安置综合开发项目安置了甘肃中、南部共计 7.53 万移民,使得流域的人口和耕地面积激增,用水量加大,生态压力增大。由于疏勒河流域在青海省境内分布均为高山冰川积雪,本文的研究区不包括疏勒河上游在青海境内的部分。

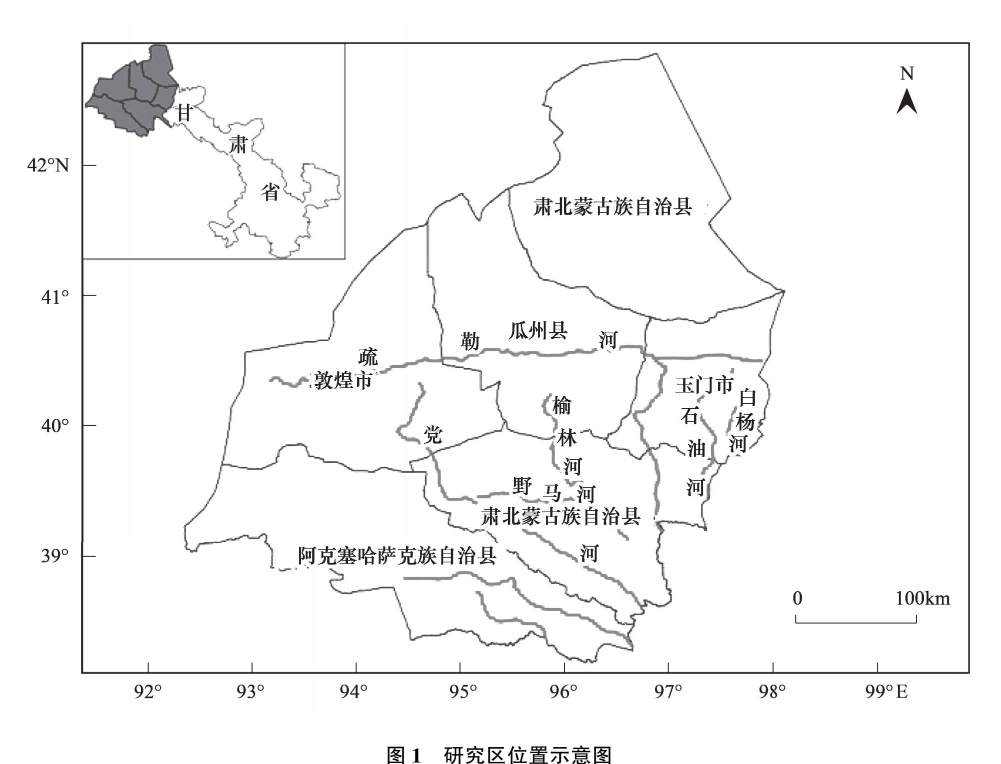


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of Shule river basin

1.2 数据来源

疏勒河流域面积较大,若采用 Landsat TM 等中、高分辨率的地球资源卫星数据,显然不适合大范围宏观

研究,且数据的连续性不强,时间分辨率不高,难以获得同一时间的多景影像,影像镶嵌等处理过程也会带来一定的误差。考虑到疏勒河流域土地覆盖类型简单,本文采用 MODIS 的归一化差异植被指数(NDVI)产品,完全能够满足精度要求,而且时间分辨率高,便于分析植被动态变化特征。数据获取自 Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System(LAADS)(http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/order.html)网站,为 16d 合成数据,空间分辨率为 1 km。下载 MOD17A3 NPP 产品用于与估算值进行比较。气象数据包括月平均气温,月总降水量和月总太阳辐射,取自中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do)。为了保证空间插值精度,共选取研究区内及周边的常规气象站 56 个,太阳辐射监测站点 8 个。数字高程模型(DEM)数据获取自美国地质勘查局(United States Geological Survey,USGS)网站(http://glovis.usgs.gov/),分辨率为 1 km。植被类型数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn),为便于分析,将指标类型归并为针叶林、阔叶林、灌木林地、草原、农田、荒漠、水体及无植被地段 8 类。

2　研究方法

2.1　NPP 估算

采用 CASA 模型计算 NPP(表 1),该模型虽然简化了生理生态基础,光能传递与转换过程中存在一定的不确定性,但是该模型易于实现区域尺度转换,且模型中的参数均可由遥感或空间分析方法获得,适用于区域和全球尺度上的 NPP 估算。区域实际蒸散量 $E(x,t)$ 根据周广胜[13]建立的区域实际蒸散模型求取,区域潜在蒸散量 $E_p(x,t)$ 根据 Boucher 等[14]提出的互补关系求取。最大光能利用率 ε_{max} 的取值因不同的植被类型而有所不同,本文采用朱文泉等[15]和 Running 等[16]根据生态生理过程模型 BIOME-BGG 对 10 种植被类型所模拟的值:针叶林 1.008 gC/MJ,阔叶林 1.044 gC/MJ,灌丛 0.768 gC/MJ,草原 0.608 gC/MJ,农田 0.604 gC/MJ,荒漠、无植被地段和水体等取全球月平均最大光能利用率 0.389 gC/MJ。

表 1　基于改进 CASA 模型的 NPP 计算[13-17]

Table 1　Calculation of the vegetation net primary production based on the CASA model

编号 No.	计算式 Calculation formula	参数说明 Parameter description
1	$\mathrm{NPP}(x,t) = \mathrm{APAR}(x,t) \times \varepsilon(x,t)$	$\mathrm{APAR}(x,t)$ 是像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(gC m^{-2} 月$^{-1}$),$\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的光能利用率(gC/MJ)
2	$\mathrm{APAR}(x,t) = \mathrm{SOL}(x,t) \times \mathrm{FPAR}(x,t) \times 0.5$	$\mathrm{SOL}(x,t)$ 表示 t 月像元 x 处的太阳总辐射量(MJ m^{-2} 月$^{-1}$),FPAR 为植被层对太阳入射光合有效辐射的吸收比例
3	$\mathrm{FPAR}(x,t) = \alpha \mathrm{FPAR}_{\mathrm{NDVI}} + (1-\alpha)\mathrm{FPAR}_{SR}$	α 值取 0.5
4	$\mathrm{FPAR}_{NDVI} = \frac{\mathrm{NDVI}_{(x,t)} - \mathrm{NDVI}_{(i,\min)}}{\mathrm{NDVI}_{(i,\max)} - \mathrm{NDVI}_{(i,\min)}} \times (\mathrm{FPRA}_{\max} - \mathrm{FPRA}_{\min}) + \mathrm{FPRA}_{\min}$	$\mathrm{NDVI}_{(i,\max)}$ 是像元 x 在 t 月的归一化差值植被指数,$\mathrm{NDVI}_{(i,\max)}$ 和 $\mathrm{NDVI}_{(i,\min)}$ 分别表示第 i 种植被类型的 NDVI 的最大值和最小值,$\mathrm{FPAR}_{\min}$ 和 $\mathrm{FPAR}_{\max}$ 分别取值 0.001 和 0.95
5	$\mathrm{FPAR}_{SR} = \frac{SR_{(x,t)} - SR_{(i,\min)}}{SR_{(i,\max)} - SR_{(i,\min)}} \times (\mathrm{FPRA}_{\max} - \mathrm{FPRA}_{\min}) + \mathrm{FPRA}_{\min}$	SR 为简单比值植被指数,$SR(x,t) = \frac{1+\mathrm{NDVI}_{(x,t)}}{1-\mathrm{NDVI}_{(x,t)}}$,$SR_{(i,\min)}$ 和 $SR_{(i,\max)}$ 分别对应某种植被类型 NDVI 的 5% 和 95% 处的百分位数
6	$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon1}(x,t) \times T_{\varepsilon2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{\max}$	$T_{\varepsilon1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 分别为低温和高温对光能利用率的胁迫作用,$W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数,$\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下植被的最大光能利用率
7	$T_{\varepsilon1}(x,t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\mathrm{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\mathrm{opt}}(x)]^2$	$T_{\mathrm{opt}}(x)$ 为某一区域年内 NDVI 值达到最高时的月平均气温
8	$T_{\varepsilon2}(x,t) = 1.184/\{1+\exp[0.2 \times (T_{\mathrm{opt}}(x) - 10 - T(x,t))]\} \times 1/\{1+\exp[0.3 \times (-T_{\mathrm{opt}}(x) - 10 - T(x,t))]\}$	$T(x,t)$ 为月平均温度,当某月平均温度比最适温度 $Topt(x)$ 高 10 ℃或低 13℃时,该月的 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 值等于月平均温度 $T(x,t)$ 为最适温度 $Topt(x)$ 时 $T_{\varepsilon2}(x,t)$ 值的一半
9	$W_{\varepsilon}(x,t) = 0.5 + 0.5 \times E(x,t)/E_p(x,t)$	$E(x,t)$ 是区域实际蒸散量,$E_p(x,t)$ 是区域潜在蒸散量

根据56个气象站的海拔高度和月平均气温资料,计算流域各月平均气温的垂直递减率,再根据气象站点海拔高度,将观测气温换算为海拔高度为"0"处的气温值。利用普通Kriging插值法,模拟海拔为"0"处的温度$T_{k(x,t)}$;根据DEM和气温垂直递减率,模拟起伏地形下的真实温度$T_{(x,t)}$。降水数据直接采用Kriging插值对气象站点观测数值进行插值。本文对CASA模型中计算参数的主要改进如下:(1)考虑到南部祁连山区和北部马鬃山地形复杂,若仅仅依靠气象观测站空间插值的结果来描述流域太阳总辐射的空间分布,误差较大。因此,本文通过DEM提取参数,充分考虑地形之间相互遮蔽对太阳总辐射的影响,利用日照百分率与天文辐射拟合太阳总辐射,获取经验系数,从而较准确地计算出起伏地形下的太阳总辐射。(2)本文在计算水分胁迫因子时,保持了原模型中的植物生理生态学因素,但回避了其复杂的土壤参数计算,只利用气象数据通过区域蒸散模型进行估算。

2.2 NPP变化分析方法

2.2.1 年际变化率计算(趋势分析)

一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势,通过不同时期单个像元的空间变化特征,综合表征一定时间序列的区域格局演变规律。该方法的优点是可以消除由于异常因素对NPP的趋势分析所造成的影响,真实地反映长时间序列NPP的演化趋势。计算式为[18]:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times \text{NPP}_i) - \sum_{i=1}^{n} i \times \sum_{i=1}^{n} \text{NPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{1}$$

式中,Slope是线性拟合方程的斜率;NPP_i是第i年通过最大值合成法得到的NPP值,n为研究时段的长度。

2.2.2 稳定性分析(变异系数)

采用稳定性分析来计算2001—2010年每个栅格NPP的变异系数,用其来评估时间序列上的稳定性,计算式为[19]:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{2}$$

式中,C_v为变异系数,$\bar{x}$为平均值,σ为标准差。C_v值越小,表示数据分布越集中,数据随时间序列波动小,具有较好的稳定性;反之则表示数据分布较离散,数据随时间序列波动较大。

2.2.3 Hurst指数

采用R/S分析法来估算Hurst指数,从而分析NPP的持续性特征。篇幅所限,计算原理详见参考文献[20]。Hurst的值域为0—1之间,若$0.5<H<1$,说明研究的时间序列是一个持续性的序列,并且具有长期相关的特征,值越接近于1,持续性越强;若$H=0.5$,则表明NPP时间序列不是持续性序列,而是随机性序列,而且它们之间并不存在长期相关的特征;若$0<H<0.5$,则表现出反持续性,并且值越接近0,其反持续性越强。

2.2.4 NPP与气候因子的相关性分析

利用基于像元的空间分析法,计算NPP与降水或气温的相关系数,通过计算两者的简单相关系数,进而获得偏相关系数。计算式详见参考文献[21]。采用t检验法对偏相关系数进行检验。

3 结果与分析

3.1 精度验证

在ArcGIS软件支持下,将空间化后的各参数代入CASA模型进行栅格地图代数运算,得到2001—2010年逐月NPP空间分布。全球或区域尺度上的NPP估算结果的精度验证问题,始终是NPP遥感定量反演的难题,也是最具争议的问题。精度验证一般有两种方法:一是将估算值与实际测量的数值进行对比;二是将估算的NPP空间分布与他人在相同区域采用其他模型计算的结果或遥感数据产品进行对比。首先利用2010年7月和9月两次在疏勒河流域玉门、瓜州、敦煌和阿克塞选取的20个点作为野外精度验证点,设置样方为100

m×100 m,利用对角线采样法[22]获得植被的地上生产力和地下生物量,计算地面实测 NPP。受条件限制,样方实测地点多选择设置在绿洲边缘的荒漠草原和草甸草原内,农田无法实测生物量,只记录作物类型进行转换。由于地下生物量实测难度较大,部分样地的植被地下生物量数据通过计算根冠比得到[23]。用 GPS 记录实测数据的地理位置坐标,提取相应的基于改进的 CASA 模型计算出的 NPP 数据,进行估算值的精度验证。相关性分析(图 2)表明,估算值与地面实测值之间的相关性非常显著,决定系数 $R^2=0.8811$,$P<0.01$,说明改进的 CASA 模型适用于疏勒河流域 NPP 的估算。误差分析显示,CASA 模型估算的 NPP 与地面实测 NPP 的平均绝对误差为 37.13 gC m^{-2} a^{-1},平均相对误差为 0.208,均较小。因实际样方大小(100 m)与 MODIS 像元分辨率(1 km)差距很大,误差在所难免。总体来看,估算值在荒漠草原偏低而在草甸草原偏高。

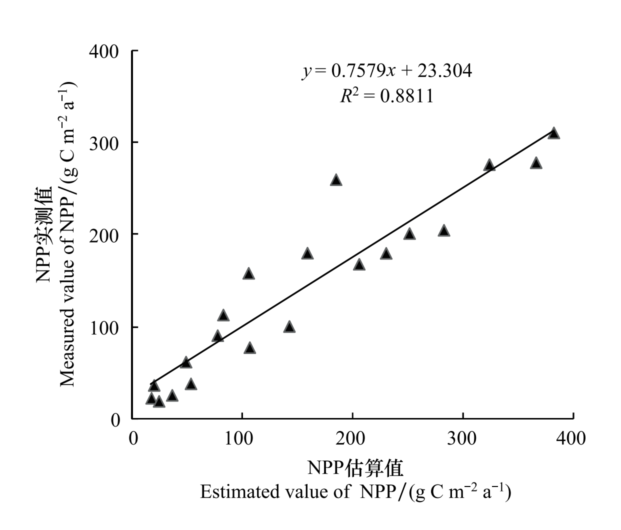


图 2　NPP 实测值与模型估算结果的比较

Fig.2　Comparison between measured and estimated NPP

虽然野外调查所获取的生物量数据比较可靠,但很难在整个流域区内进行大范围相对均匀的实地调查取样。加之研究时段跨度为 10a,生物量分布的空间和时间异质性较大,因此如果简单地利用有限的实地调查所获得的平均生物量来推算整个区域的生物量,则可能产生较大误差。为此,本文将估算结果与 2001—2010 年 MODIS 的 1 km 年分辨率 NPP 产品(MOD17A3)进行了对比,发现估算的 NPP 与 MOD17A3 产品在空间分布上较为吻合,除去 2001、2003、2007、2010 年这 4a 中 MOD17A3 值与估算值相差稍大外,其余年份相差很小,差值介于 2.18—21.53 gC m^{-2} a^{-1}之间。MOD17A3 年总量与本文估算结果总体差距亦不大,差距较大的年份是 2001 年和 2003 年,且除 2001 年外,各年份估算的 NPP 总量均略高于 MOD17A3 值。总体而言,MOD17A3 的 NPP 年际波动明显大于本文估算值。

3.2　年平均 NPP 的空间分布

2001—2010 年,疏勒河流域年均单位面积上的 NPP 空间分布状况见图 3。疏勒河流域 NPP 值小于 100 gC m^{-2} a^{-1}的区域占流域总面积的比重高达 62.9%,反映出流域整体生产力水平不高。从空间分布来看,流域 NPP 值呈现南高北低、东高西低的态势,表现出较为明显的经向地带性"条带"分布特征,即上游的祁连山区和中游的绿洲区 NPP 较高,其两侧的戈壁荒漠和洪冲积扇 NPP 较低。这也是干旱内陆河流域普遍具有的特点,体现了绿洲—荒漠—山地耦合生态系统的典型特征。流域 NPP 最高的区域是上游地带,西祁连山高寒荒漠草原区、柴达木盆地东北部山地高寒荒漠草原区以及阿尔金山高寒荒漠草原区的 NPP 值一般均在 150 gC m^{-2} a^{-1}以上,自然植被以高山草甸为主。流域中下游地势低平,NPP 高值区均分布在以灌溉农业为主的绿洲区。北部的马鬃山风蚀荒漠区和花牛山-柳园灌木-半灌木荒漠区植被稀疏,大部分区域 NPP 在 50—100 gC m^{-2} a^{-1}之间。NPP 最低的区域分布在敦煌西部的库木塔格沙漠、阿克塞北部的安南坝以及瓜州的安西极旱荒漠保护区,NPP 值大都在 50 gC m^{-2} a^{-1}以下。

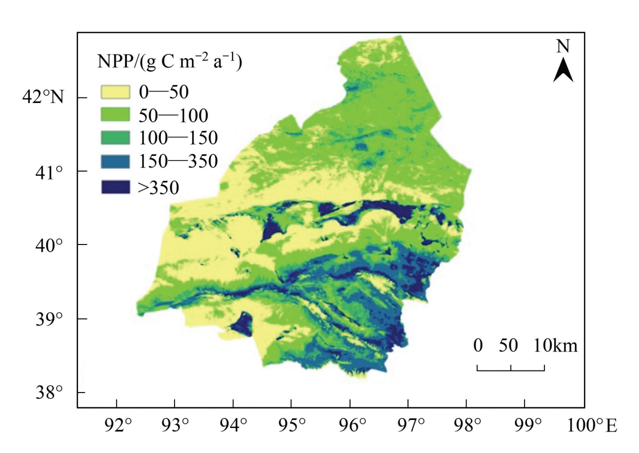


图 3　2001—2010 年疏勒河流域 NPP 平均值的空间分布

Fig.3　Spatial distribution of 10-year mean annual NPP of Shule River basin in 2001—2010

3.3 NPP 年际变化特征

疏勒河流域年均 NPP 值 2001 年最低,2010 年最高,分别为 99.97 gC m^{-2} a^{-1} 和 127.2 gC m^{-2} a^{-1},2001—2010 年平均 NPP 值为 125.08 gC m^{-2} a^{-1}。从 NPP 值的变化来看(图 4),大致可分为两个阶段:2001—2008 年,NPP 由急剧上升变为 2008 年之后的小幅波动;2008—2010 年,NPP 由急剧下降转为急剧上升。整体来看,10 间 NPP 值整体呈现出波动中上升的趋势。从 2001—2010 年,NPP<50 gC m^{-2} a^{-1} 的区域面积整体上呈减少的趋势,而 NPP>350 gC m^{-2} a^{-1} 的区域面积整体则呈现增加的趋势。

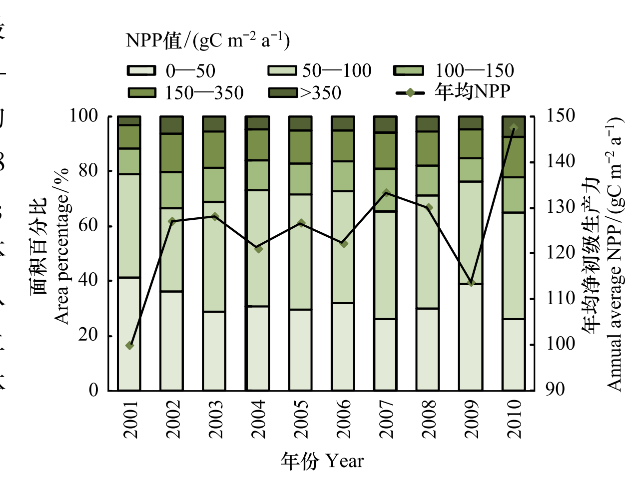


图 4 2001—2010 年疏勒河流域年平均 NPP 变化趋势

Fig. 4 The change trend of monthly average NPP in the Northwest Arid Region from 2001 to 2012

3.4 NPP 空间变化特征

3.4.1 总体趋势

图 5 为 10 年来疏勒河流域年最大 NPP 的变化趋势,流域年最大 NPP 呈缓慢增加趋势,平均趋势系数为 1.79。NPP 增加的区域占总面积 25.15%,其中显著增加区域为 6.59%,轻度增加区域为 18.56%,主要分布于南部的肃北、玉门的南部及阿克塞的东部;基本不变的区域约占 62.92%;减少的区域较少,约占总面积的 11.93%,其中轻度减少区域为 10.11%,显著减少的区域仅为 1.81%,主要分布于北部的肃北、阿克塞中部及玉门、瓜州、敦煌的绿洲周围。

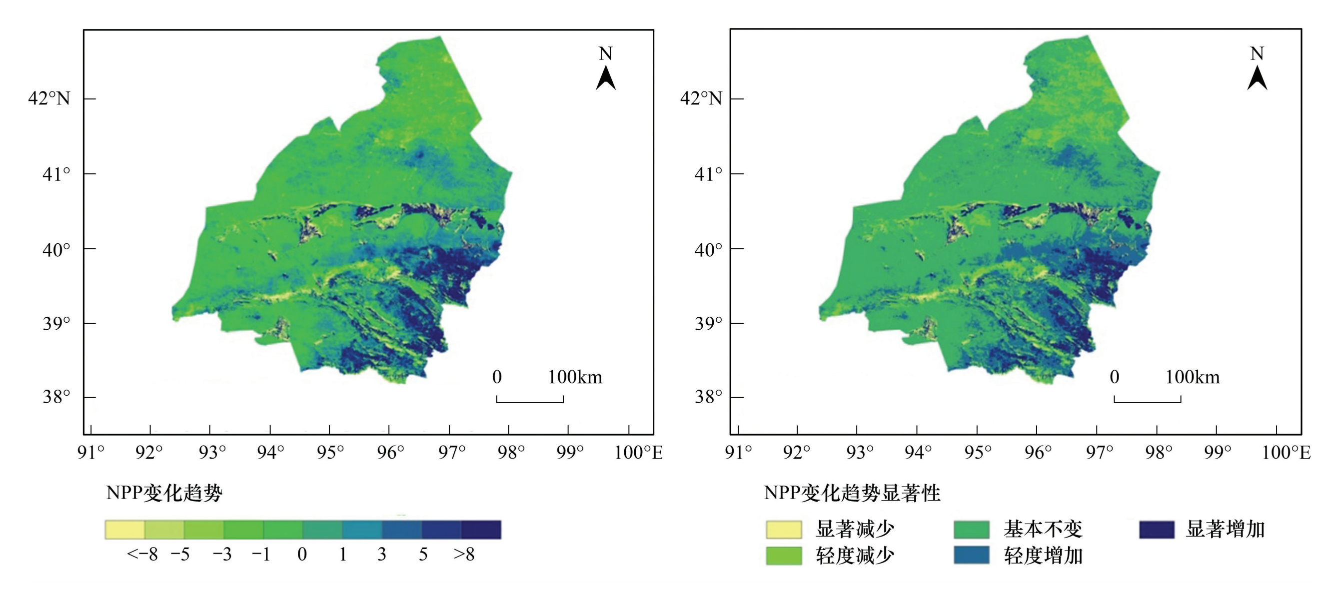


图 5 2001—2010 年疏勒河流域 NPP 线性变化趋势图

Fig.5 Distribution of linear trend of annual NPP changes in the Shule River basin from 2001 to 2010

3.4.2 NPP 变化的稳定性

由 10 年间疏勒河流域 NPP 变异系数分布图(图 6)可知,疏勒河流域 NPP 整体呈现"一头大一头小,高低波动并存,低度波动居多"的分布格局。整个流域不同地区的 NPP 稳定性存在明显的空间差异,高波动区多分布在白杨河、石油河、疏勒河干流、榆林河、党河、安南坝河等河流两侧,说明这些区域易受到自然或人为扰动,植被的稳定程度低。中等波动区域大都分布在上游和中下游之间的冲、洪积扇。低波动区域则连片分布于流域北部和西部。低波动区域占流域总面积的 56.74%,较低波动区占 38.12%,而高波动区仅占 0.3%,这说明疏勒河流域 NPP 整体相对稳定。

3.4.3　NPP 变化的未来趋势特征

前述分析主要是对 10 年来疏勒河流域 NPP“格局-过程”的解释,而对于其未来的变化趋势尚不明确,为此,借助于 Matlab 和 ArcGIS 软件,计算研究区 NPP 的 Hurst 指数。Hurst 的值域范围为 0.1—1,均值为 0.58。反持续性占流域总面积的 21.70%,持续性占流域面积的 78.30%,说明疏勒河流域 NPP 变化的同向特征要强于反向特征。将 Hurst 指数划分为弱、中、强 3 个持续性类型,其阈值分别为:<0.5,0.5—0.65 和>0.65。从弱、中、强的程度来看,中强程度的反持续性仅占流域面积的 3%,弱反持续性占 18.7%,弱持续性占 49.93%,说明疏勒河流域有一半的区域未来 NPP 的变化与过去 NPP 的变化相一致,但这种持续性表现得并不够明显。中、强持续性所占比重分别为 19.83%和8.54%,这些区域未来 NPP 的变化与过去 NPP 变化有较强的相关性。

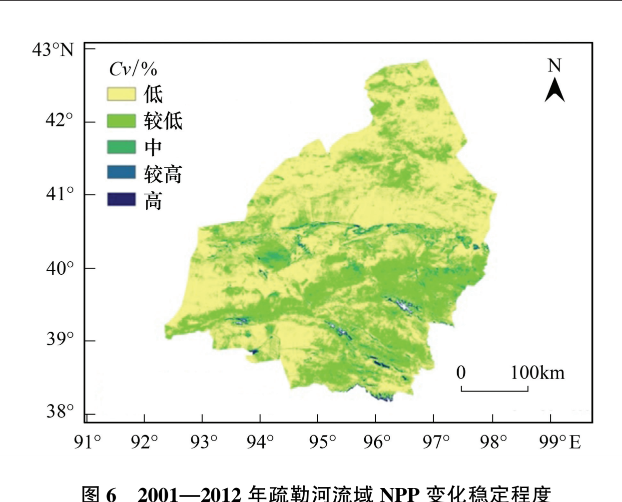


图 6　2001—2012 年疏勒河流域 NPP 变化稳定程度

Fig.6　Standard deviation of NPP changes in the Northwest Arid Region from 2001 to 2012

3.4.4　NPP 变化的趋势性和持续性综合分析

将一元线性拟合的 Slope 值与 Hurst 指数计算结果进行叠加分析,得到 2001—2010 年 NPP 变化趋势的持续性分布(图 7),为使结果更加清晰明了,共分为 12 种情形。疏勒河流域不变与弱持续性、不变与强持续性、增加与弱持续性、不变与反弱持续性占研究区面积的百分比分别为 30.50%、18.02%、12.54%和 12.15%,可见整个流域在 10 年间 NPP 分布并未大幅度地发生变化,且可持续性较差,这与前文分析的疏勒河流域 NPP 变化趋势一致。综合分析,流域减少且未来会持续性减少的面积为 9.15%,主要集中在肃北、阿克塞、敦煌地区,应加强这些地区的生态环境治理;增加且未来会继续增加的面积为 20.63%,主要分布于南部肃北、玉门瓜州的南部和阿克塞的东部,这些地区基本位于疏勒河流域的上游;特别应注意的是不变且为弱持续性的地区,其比例高达 30.50%,由于可持续性较差的原因,应防止其向退化的趋势发展,这些地区主要分布于流域的西北部。可以预见疏勒河流域 NPP 值在未来的几年还是会以不变为主,增加为辅,但不变的可持续性较差,应继续加强生态环境的治理。

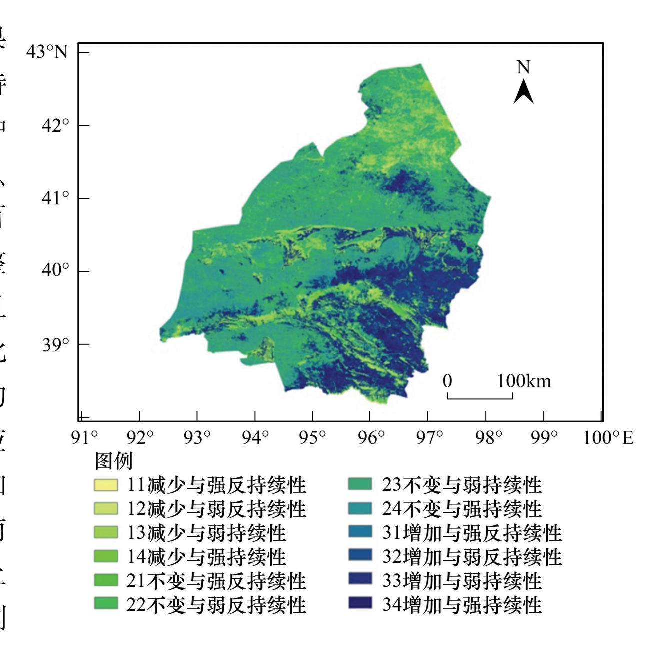


图 7　基于趋势性和 Hurst 指数的 NPP 空间变化特征图

Fig.7　The spatial change characteristics of NPP based on the Slope and Hurst index

3.5　NPP 与气候因素的相关关系

3.5.1　年 NPP 与年气候因子的相关关系

植被的生长与气候因素密切相关,由图 8 可知,疏勒河流域植被 NPP 与年降水和年均温的平均相关系数分别为 0.37 和 0.02,平均偏相关系数分别为 0.41 和-0.05,说明疏勒河流域植被年 NPP 总体上与年降水的相关性更高,呈正相关关系。比较而言,流域西北部受气温的影响较大,而东南部受降水的影响大。图 8 是 NPP 与降水的相关系数分布图,消除气温影响后(图 8),研究区内 NPP 与降水呈现正相关性的区域面积增大,且

相关性增强;而呈现负相关性的区域面积减小,相关性减弱。NPP 与气温的相关系数空间分布如图 8 所示,消除降水影响后(图 8),研究区内 NPP 与气温呈现正相关性的区域面积减小,而呈现负相关性的区域面积增大,整体相关性增强。将相关系数与偏相关系数空间分布图对比,发现大部分地区的偏相关系数较之相关系数有所下降,说明这些地区受降水和气温的共同影响。

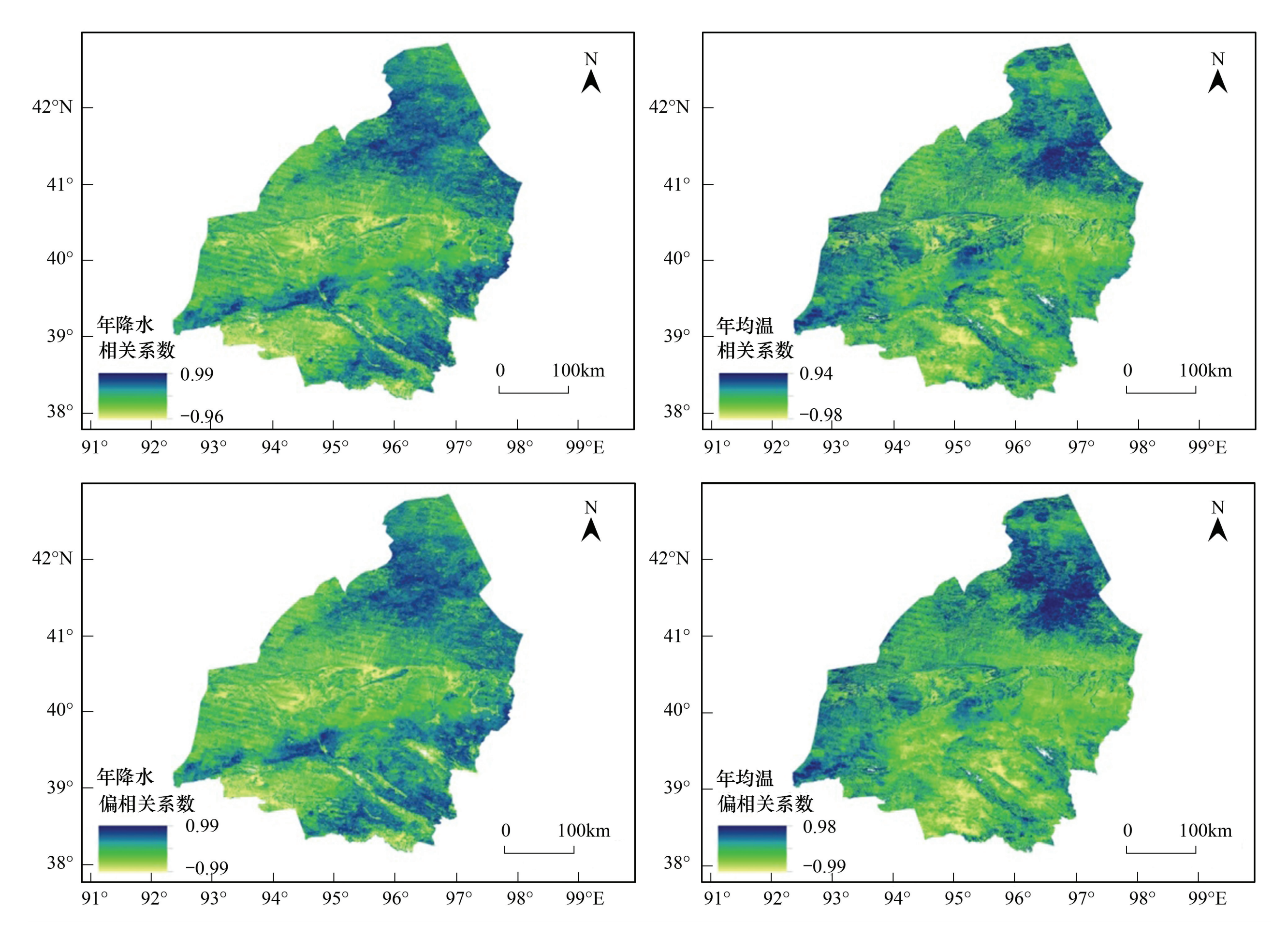


图 8 年 NPP 与年降水和年均温的相关系数及偏相关系数

Fig.8 Correlation relationship between annual NPP and annual precipitation and annual mean temperature

3.5.2 月 NPP 与当月气候因子的相关关系

疏勒河流域月均 NPP 与当月降水及当月均温的平均相关系数分别为 0.81 和 0.93,平均偏相关系数分别为-0.13 和 0.81,可见月 NPP 与当月气候因子的显著性都较年 NPP 与气候因子的相关性要高。肃北县的南部受降水的影响较大,其他县区主要受气温的影响较大。月 NPP 与当月降水量成正相关的面积占研究区面积的 34.98%(图 9),月 NPP 与当月气温成正相关的面积占研究区面积的 99.68%,说明植被 NPP 在月尺度变化上,温度是其主要影响因子。

3.5.3 月 NPP 与前一月气候因子的相关关系

气候因子对植被的生长具有一定的时滞效应,对于不同地区、不同的气候因子时滞效应程度也不同。由图 10 可知,流域月 NPP 与前一月降水量、前一月的月均温的平均相关系数分别为 0.67 和 0.69,平均偏相关系数分别为 0.20 和 0.27,可见月 NPP 与前一月的降水和当月降水的相关系数的大小接近,而月 NPP 与前一月的气温的相关系数较当月的气温相关系数有明显的下降。对整个疏勒河流域而言,月 NPP 对气候因子变化的时滞效应并不明显,但从空间分布来看,肃北南部、敦煌及阿克塞的部分地区的 NPP 对降水的时滞效应较为明显,而在肃北北部和玉门,NPP 对气温的时滞效应更为明显。

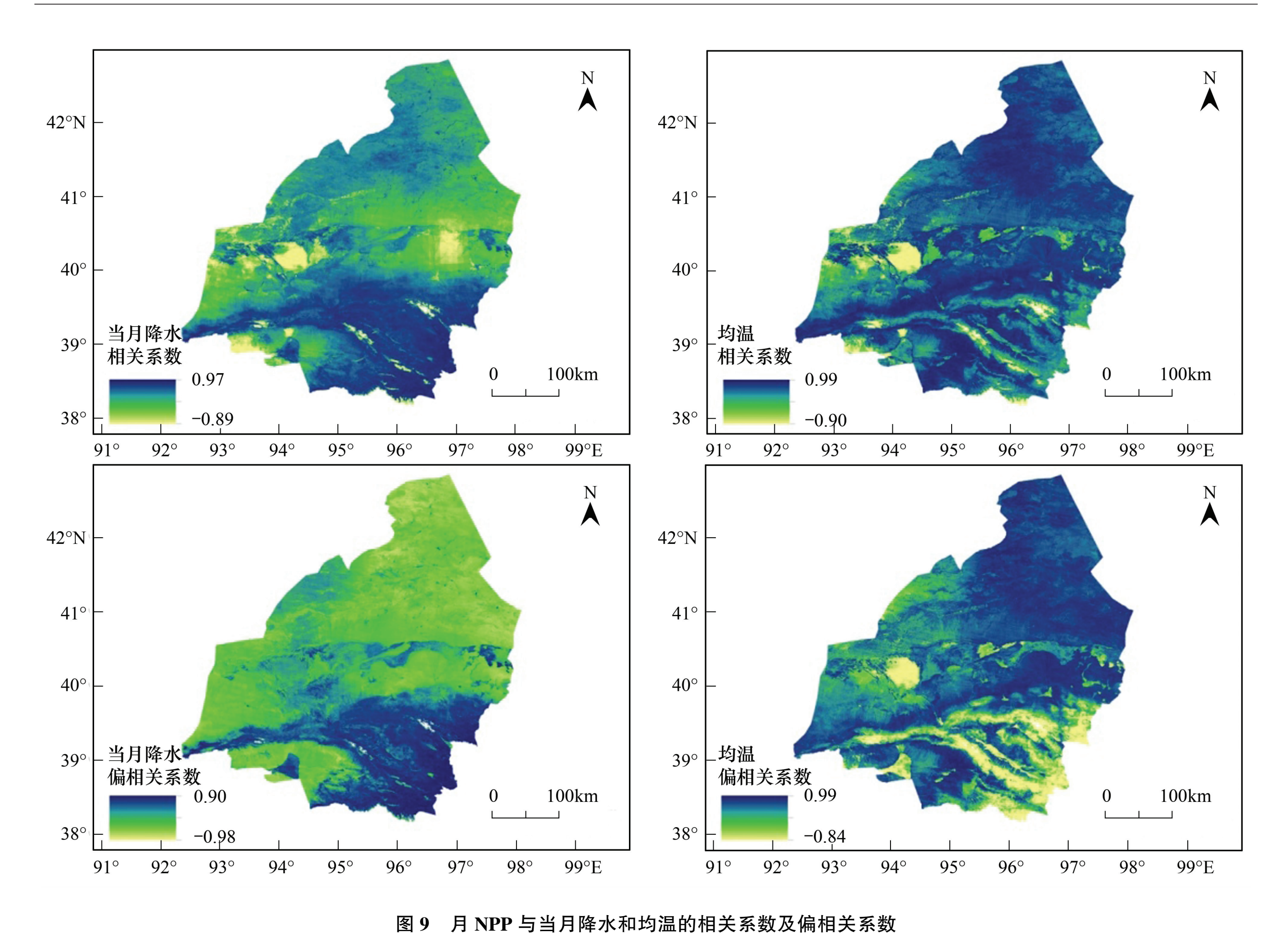


图 9　月 NPP 与当月降水和均温的相关系数及偏相关系数

Fig.9　Correlation relationship between monthly NPP and monthly precipitation and monthly mean temperature

4　讨论

目前,前人关于疏勒河流域 NPP 的模拟研究极少,而且模拟的疏勒河流域不同生态系统 NPP 值存在很大差异。本文模拟的 2001—2010 年疏勒河流域 NPP 平均值为 102.26 gC m^{-2} a^{-1},与张娟等[24]的结果(95.2 gC m^{-2} a^{-1})接近,高于刘春雨等[25]的模拟结果(55.89 gC m^{-2} a^{-1})。就植被类型而言,本文估算的安西荒漠草地 NPP 平均值为 266.47 gC m^{-2} a^{-1},也与张娟等[24]和张杰等[26]的研究结果接近。不同学者模拟结果不一致的主要原因:1)研究的时间序列不一致;2)数据源的时空分辨率不同;3)所用的模型不同;4)使用 CASA 模型时,气象数据的插值大都未考虑地形对气温、降水和太阳辐射空间分布的影响。

2001—2010 年疏勒河流域净初级生产力的空间变化以波动式增加为特征,NPP 增加显著且持续性较强的区域主要分布在肃北县南片区、阿克塞县的疏勒河上游地区,以及中游的玉门和瓜州绿洲农田区;而 NPP 显著减少且持续性较强的区域主要分布于肃北北片区的马鬃山地区、疏勒河下游干流以及各支流的绿洲外围地区。在干旱内陆河流域,水资源是维系绿洲—荒漠生态系统发育与演化的首要因素。疏勒河中下游绿洲地区农田为主的 NPP 持续增加与绿洲外围荒漠草地植被 NPP 的持续减少,在一定程度上反映出人类活动对水资源的调控在农业生产上的积极效应,但另一方面,农业用水、生产用水、生活用水的增加使得生态用水被严重挤占,引起自然植被退化和生产力下降。仅疏勒河下游的敦煌市和瓜州县,人口就由 1989 年的 18.26 万增加到 2010 年的 33.48 万。尽管气候因素是疏勒河流域 NPP 时空变化的重要影响因素,但研究时段内人类活动的不断增强对植被 NPP 的影响也不断加大,长远来看,必将反作用于人类生活,产生不利影响。按照"反规划"的思想,从流域 NPP 变化及其影响因子的空间分布情况,可以判断出某区域影响植被 NPP 演变的限制因

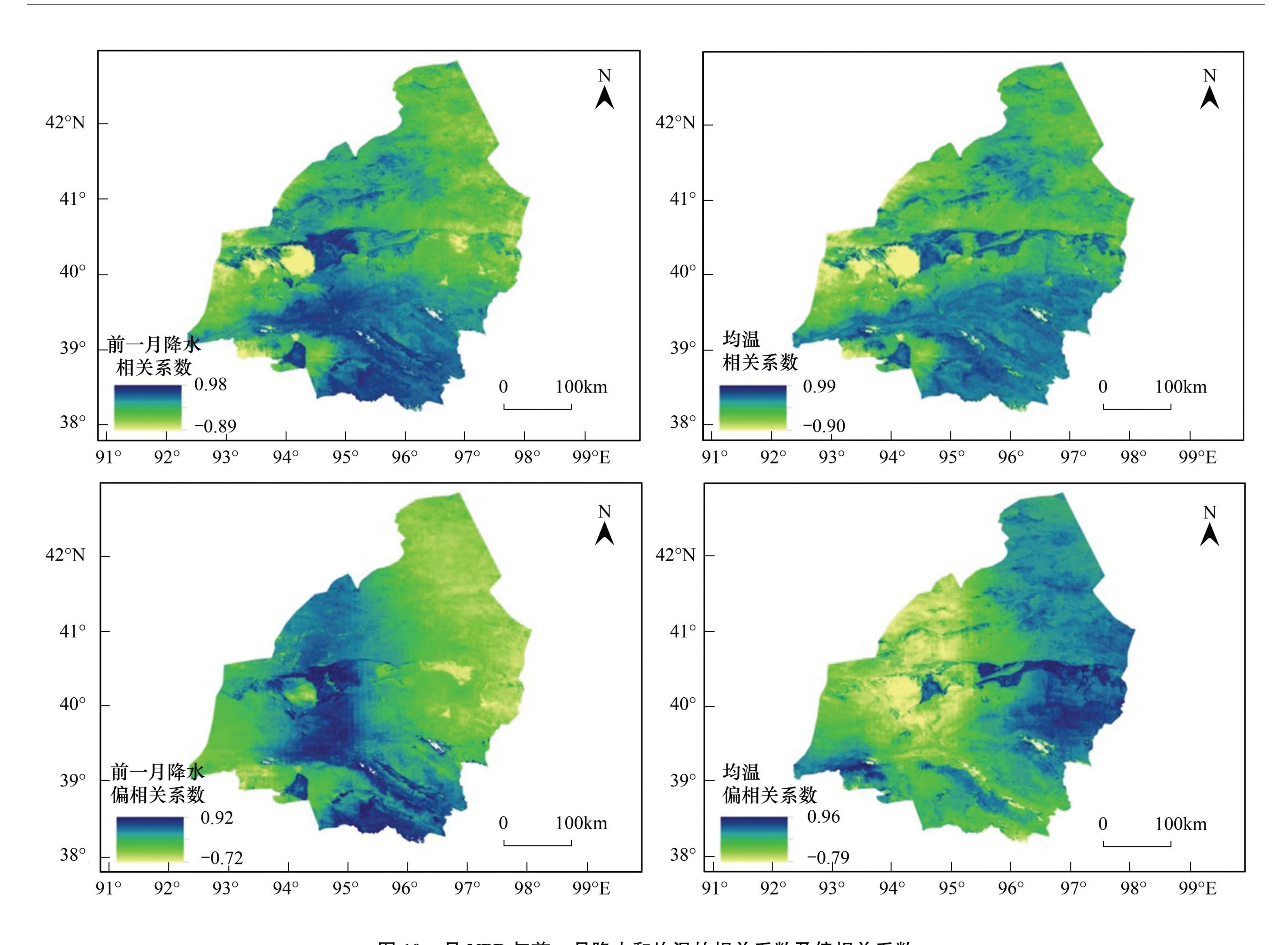


图 10 月 NPP 与前一月降水和均温的相关系数及偏相关系数

Fig.10 Correlation relationship between monthly NPP and previous monthly precipitation and monthly mean temperature

素,从而对该区采取有目的的人为干预,确保植被恢复与生态重建,维护区域生态安全。

NPP 的时空变化受多种因素的综合影响,本文所采用的改进 CASA 模型的模拟结果取决于植被指数和气象数据,未考虑土壤状况、大气二氧化碳浓度以及人类活动等对 NPP 的影响,计算结果与实际状况必然存在偏差,但遥感反演的 NPP 是一个综合性指数,可以反映植被长势与生境条件,故本文的研究结果仍具有科学参考价值。目前已经提出的 NPP 估算模型和方法,各有其优势和不足,尚无统一的普适性方法。本文虽对 CASA 模型进行了改进,但所采用模型中有些静态参数是直接利用已有的研究成果,这些参数多是依赖于较小尺度的实验区或少数试验站的监测数据测算得到的,直接将其利用到大区域上,必然会对估算结果产生影响。对于各种类型的区域、不同的尺度采用适合建模参数将是下一步研究的重点。此外,研究区气象站点(尤其是太阳辐射站点)较少且分布不均,虽然对气象数据插值方法做了改进,但是还需发展更加有效和精确的插值方法以提高模型估算精度。

参考文献(References):

[1] Leith H, Wittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer Verlag, 1975.

[2] Michaletz S T, Cheng D L, Kerkhoff A J, Enquist B J. Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients. Nature, 2014, 512(7512): 39-53.

[3] Ponce-Campos G E, Susan Moran M, Huete A, Zhang Y G, Bresloff C, Huxman T E, Eamus D, Bosch D D, Buda A R, Gunter S A, Scalley T H, Kitchen S G, McClaran M P, Henry McNab W, Montoya D S, Morgan J A, Peters D P C, John Sadler E, Seyfried M S, Starks P J. Ecosystem resilience despite large-scale altered hydroclimatic conditions. Nature, 2013, 494(7437): 349-352.

[4] Ebermayer E. Die bestandtheile der streumaterialien // Die gesammte Lehre der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues.

Unter Zugrundlegung der in den Königl. Staatsforsten Bayerns angestellten Untersuchungen. GmbH Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1876.

[5] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 刘娅, 赵其国. 2000-2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.

[6] Schuur E A G, Bockheim J, Canadell J G, Euskirchen E, Field C B, Goryachkin S V, Hagemann S, Kuhry P, Lafleur P M, Lee H, Galina Mazhitova, Nelson F E, Rinke A, Romanovsky V E, Shiklomanov N, Tarnocai C, Venevsky S, Vogel J G, Zimov S A. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. BioScience, 2008, 58(8): 701-714.

[7] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 815-835.

[8] 杨勇, 李兰花, 王保林, 宋向阳, 刘爱军, 王明玖. 基于改进的 casa 模型模拟锡林郭勒草原植被净初级生产力. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2344-2352.

[9] 戴尔阜, 李双元, 吴卓, 闫浩文, 赵东升. 中国南方红壤丘陵区植被净初级生产力空间分布及其与气候因子的关系——以江西省泰和县为例. 地理研究, 2015, 34(7): 1222-1234.

[10] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001-2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.

[11] 常跟应, 张文侠. 基于生态文明的疏勒河流域大规模移民反思. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(3): 405-509.

[12] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO_2 budget. Science, 1990, 247(4949): 1431-1438.

[13] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候-植被分类研究. 植物学报, 1996, 38(1): 8-17.

[14] Boucher J, Quilliot D, Pradères J P, Simon M F, Grès S, Guigné C, Prévot D, Ferry G, Boutin J A, Carpéné C, Valet P, Saulnier-Blache J S. Potential involvement of adipocyte insulin resistance in obesity-associated up-regulation of adipocyte lysophospholipase D/autotaxin expression. Diabetologia, 2005, 48(3): 569-577.

[15] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.

[16] Running SW, Thornton PE, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System // Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, Howarth R W, eds. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer Verlag, 2000: 44-57.

[17] 尹锴, 田亦陈, 袁超, 张飞飞, 苑全治, 花利忠. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 133-139.

[18] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.

[19] 叶辉, 王军邦, 黄玫, 齐述华. 青藏高原植被降水利用效率的空间格局及其对降水和气温的响应. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1237-1247.

[20] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs. Trans of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-799.

[21] Liu C Y, Dong X F, Liu Y Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China. Catena, 2015, 125: 190-199.

[22] Gill R A, Kelly R H, Parton W J, Day K A, Jackson R B, Morgan J A, Scurlock J M O, Tieszen L L, Castle J V, Ojima D S, Zhang X S. Using simple environmental variables to estimate below-ground productivity in grasslands. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(1): 79-86.

[23] 张镱锂, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211.

[24] 张娟, 田文婷, 颉耀文. 疏勒河流域 NPP 时空变化分析. 安徽农业科学, 2015, 43(25): 227-230, 273-273.

[25] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英. 不同尺度视角下大敦煌 NPP 分布格局研究. 资源科学, 2014, 36(2): 406-512.

[26] 张杰, 张强, 郭铌, 孙冰. 荒漠草原牧草净生产力的遥感估算及其可行性研究. 西北植物学报, 2006, 26(11): 2324-2330.